

第3章 遠隔共同作業支援システム： AgoraG

3.1 緒言

本章では、前節で挙げたコミュニケーションにおけるフィードバックを支援した実画像通信システムを構築するための4つの要件に従い、遠隔地の作業者と共同作業を行えるシステムの構築に関して議論する。本研究で構築したシステム AgoraG は、Agora Systems と呼ばれる遠隔共同作業支援のためのシステムのひとつであり、Agora とはギリシア語で「広場」を意味した言葉である。Agora Systems にはいくつかの拡張があるが、本研究では遠隔操作型レーザスポット GestureLaser を用いた遠隔指示の支援を行っているため、GestureLaser の G を取り、AgoraG と呼んでいる。

このシステムは、遠隔地にいる作業者を等身大で投影することが可能な遠隔業者投影用スクリーンに加え、作業者が実物体や文書を映像として共有しつつ相互に指さしが可能な仮想共有作業領域を備えている。これらの領域は、正面のスクリーンに投影された遠隔地の作業者の画像との身体的な配置関係を考慮しつつ、分散するように配置している。

このように、共同作業に利用する機材や作業用の領域を対照的、かつ分散した位置へ配置することは、単にあたかも机を狭んで対面しているような臨場感を出すだけではなく、作業者らの興味に応じて変化する身体の向きをより大きく表現させることが可能となる[山下 99, 山崎 98]。

本章では、システムを次の4つの要素の分けて解説を行う。

- 作業領域およびスクリーン

- 仮想共同作業領域
- 遠隔操作型レーザーポインタシステム
- 実画像通信用ネットワークシステム

3.2 作業領域およびスクリーン

3.2.1 共同作業用机

作業を行うための机であり、幅、奥行とも90cmとなっている。従って作業者は遠隔地の作業者の画像を、90cm先に設置されたスクリーンを通して観察することができる。90cmという距離は現在用いられているミーティングデスクの標準的な奥行であり、Hallの分類によれば個体距離に相当する[ホー70]。

3.2.2 作業者投影用スクリーンおよび撮影用カメラ

60インチの背面投影型スクリーンを利用して遠隔地の作業者を投影している。作業者の様子はスクリーンに取り付けられた小型カラーカメラによって撮影される。スクリーンに投影される作業者の大きさはほぼ原寸大となるように調整し、適切な映像効果が出せるように設定した[黒須95]。

視線が一致しているような感覚を得るためには、ディスプレイを見ている人物の視線の延長上にカメラを配置する必要がある。たとえば従来のビデオ会議システムなどではカメラはディスプレイの上部に設置されているが、相手の顔を見ながら話そうとすると、両者とも下向きの顔が表示され、視線の一致を行うことは不可能であった[吉田95]。今回作成したシステムでは、作業者の正面全体がスクリーンとなるため、作業者の様子を撮影するカメラをスクリーンの正面に置く必要性が生じた。そこでスクリーン上端から伸びる、無色透明の塩ビ板で作成した台を作成し、そこに顔画像撮影用カメラを設置した。

完全な視線の一致を図るには、投影された相手画像で目にあたる部分にカメラを置かなければならないが、この場合、投影された相手の顔の部分にカメラが位置す

ることになり、顔の表情を読みとることが困難になる。特殊スクリーン[IOJ+96]やハーフミラー[IKG92]を使うことで視線一致を支援するシステムも存在するが、いずれも顔画像を撮影するカメラのレンズ中心から顔が移動してしまうと、視線の方向を正確に再現することは困難となる。

ここでは、視線の不一致を感じないための視差角の許容度は、相手との距離に関係なく上下8センチという報告[森井 93]を参考に、カメラが投影された相手画像の顎のあたりになるようにカメラを設置した。

スクリーンの大きさに比べ、このカメラの大きさは十分に小さいので、このカメラが原因によって作業が妨げられる現象は、これまでの実験では見られなかった。カメラの撮像範囲は、作業者の手もとを含めた上半身全体が撮影されるように調整されている。

表 3.1: 小型カラーカメラ CP60H 仕様

項目	仕様
Horizontal resolution	450TV lines
Pick-up device	1/3inch Interline CCD
Scanning System	525 lines interlaced (NTSC)
Lens interface	Fixed-focus lens, f=6.0mm, F2.5, Diagonal 53.4 deg.

3.3 仮想共同作業領域

3.3.1 システム構成

システムの基本構成は TeamWorkStation [IM91] と同じであるが、後述するタッチパネル操作型レーザポインタユニット部と併用することで、直接的な指示が行えるようになっている点が異なっている。

この領域に置かれた資料は、上部に設置された書画カメラによって撮影され、その画像が遠隔地のシステムに転送される。転送されてきた遠隔地の書画カメラ領

域の画像は、ローカルな書画カメラ領域の画像と 50% の混合比で合成され、書画カメラ領域提示用液晶ディスプレイに表示される。

書画カメラ領域の広さは A3 サイズの用紙とほぼ同等の大きさ（幅 42cm × 高さ 29.5cm）である。書画カメラには民生用 DV カメラ（SONY DCR-TRV17K, 表 3.2）を用いており、最低でも MS ゴシックで 18pt 程度の文字であれば十分に認識可能な解像度を得ている。

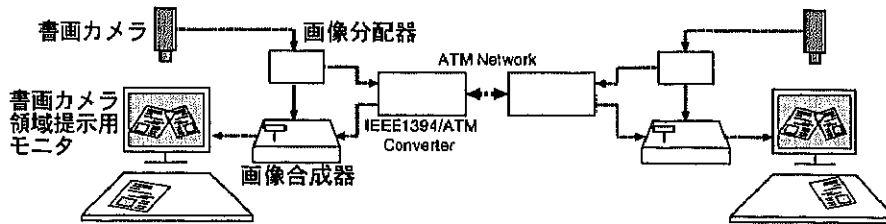


図 3.1: 書画カメラ部構成図

表 3.2: デジタルビデオカメラレコーダ DCR-TRV17K 仕様

項目	仕様
撮像素子	1/4 型 CCD 個体素子 約 68 万画素（有効画素数: 約 34 万画素）
ズームレンズ	f=3.3~33mm (35mm カメラ換算 42~420mm) F1.7~2.2

3.3.2 書画カメラの画質に関する基礎実験

書画カメラ領域の解像度を確かめるための実験を行った。実験では、紙に印刷した図形を書画カメラで撮影し、その映像を書画カメラ領域提示用ディスプレイを通して観察させた。実験で提示した図形は、視力検査に用いられるランドルト環（図 3.2）であり、外径が 1mm のものから 10mm のものまで、1mm 刻みに 10 種類準備した。ランドルト環は、環の外径に対し、環の太さ、および環の切れ目

の幅は5分の1となるように定義されている。なお、通常の視力測定と異なり、ディスプレイから被験者までの距離は制限していない。

日常生活に支障がない視力を持つ被験者3名に対し実験を行ったところ、外径4mmまでのランドルト環に関しては正解率100%であった。外径3mm以下の正解率については表3.3の通りである。

表3.3: ランドルト環の外径と正解率の関係

外 径	~4mm	3mm	2mm	1mm
正解率	100%	98%	54%	0%

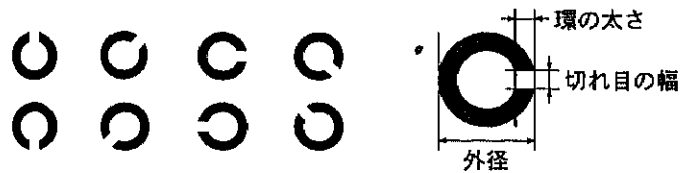


図3.2: 実験に用いたランドルト環と寸法の定義

3.4 遠隔操作型レーザーポインタシステム

書画カメラの隣には遠隔操作可能なレーザーポインタユニットが設置されている。書画カメラ提示用ディスプレイにはタッチパネルが組み込まれており、指でなぞるとその軌跡に対応して遠隔地のレーザーポインタユニットが動作し、書画カメラ領域上に置かれた資料に対して直接レーザーの軌跡を表示できるようになっている。図3.3はこのシステムの構成図である。

このシステムを用いることにより、遠隔地の資料に対して直接的な指示を行えるようになっている。

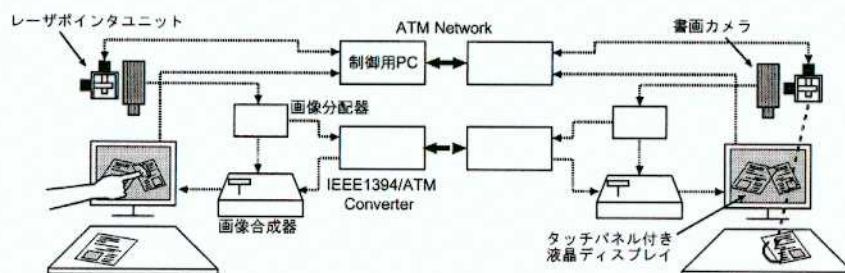


図 3.3: 遠隔操作型レーザーポインタシステム部構成図

3.4.1 レーザポインタユニット及びコントローラ

レーザーポインタユニットとして GestureLaser [YK+99] を搭載している。レーザー発光部に置かれた直交する二枚の鏡を、ステッピングモータ（オリエンタルモータ PMM33, 表 3.4）を用いて駆動することにより、レーザー光線を任意の方向に出力することが可能である。モータの分解能（1パルスあたりのモータの回転角）は 0.288 度に設定してあるため、実際にレーザースポットが書画カメラ領域に照射される時の移動量は約 1.2mm となる。レーザースポットの可動範囲は書画カメラ領域内に限定しているため、モータの最大回転角度は、横方向に 19.9 度、縦方向に 14.3 度となっている。表 3.5 はこのモータを制御するために作成したコントローラの基本仕様である。



図 3.4: 遠隔操作型レーザーポインタ GestureLaser

表 3.4: ステッピングモータ PMM33 基本仕様

項目	仕様
励磁最大トルク	0.024N・m (0.24kgcm)
基本ステップ角	0.72° (最大分割時 0.00288°)
励磁方式	マイクロステップ (16 段階, 最大 250 分割)
パルス入力信号	2パルス入力方式, 最大応答周波数 500kHz パルス幅 1 μ sec 以上, デューティ比 50%以下
重量	100g

表 3.5: コントローラ基本仕様

項目	仕様
マイクロプロセッサ	Microchip PIC16F877 20MHz
インタフェース	RS-232C (EIA232 準拠) DCE 接続
基本コマンド	絶対座標指定 相対座標指定 内部座標リセット 内部座標取得 レーザ輝度指定
通信速度	速度 :9600bps (出荷時標準) データ長 :8ビット ストップビット :1ビット パリティ :なし
電源	AC100V

表 3.6: タッチパネル基本仕様

項目	仕様	備考
検出方法	表面超音波方式	超音波周波数 5.53MHz
パネルサイズ	17 型	
分解能	X および Y 軸 :0~4095 Z 軸 :1~255	1.16 タッチポイント/mm
検出モード	タッチ + 連続 + デタッチ	
インタフェース	RS-232C (EIA232 準拠) DCE 接続	
通信速度	速度 :9600bps (出荷時標準) データ長 :8 ビット ストップビット :1 ビット パリティ :なし	
タッチ応答速度	既定値 :平均 19ms/データ 最高値 :平均 12ms/データ	

レーザースポット可動範囲の計算

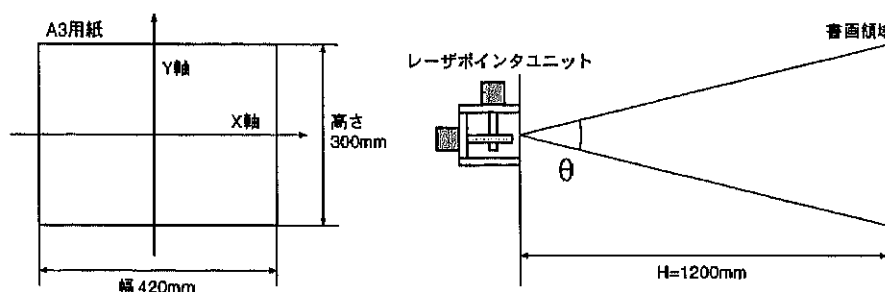


図 3.5: レーザスポットが可動すべき範囲

レーザースポットの照射対象領域は書画カメラ領域上に限定される。書画カメラ領域の広さは A3 サイズの紙と同じ広さ (幅 420mm, 高さ 300mm) に設定してあるため, 図 3.5 より, レーザポインタユニットを書画カメラ領域の上方 1200mm に設置した場合, x 軸, および y 軸方向のレーザーポインタの可動範囲 θ_x , および θ_y は

$$\begin{aligned}\tan\left(\frac{\theta_x}{2}\right) &= \frac{210}{1200}, \\ \theta_x &= 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{210}{1200}\right) \\ &= 19.9^\circ\end{aligned}\tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}\tan\left(\frac{\theta_y}{2}\right) &= \frac{150}{1200}, \\ \theta_y &= 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{150}{1200}\right) \\ &= 14.3^\circ\end{aligned}\tag{3.2}$$

となる。

モータのステップ角の決定

図 3.6 より, モータの回転角を φ , 鏡に対するレーザー光の入射角を θ とすると, 鏡から照射対象物に対して鉛直に延びる線と, 鏡に反射されたレーザーの出力方向が

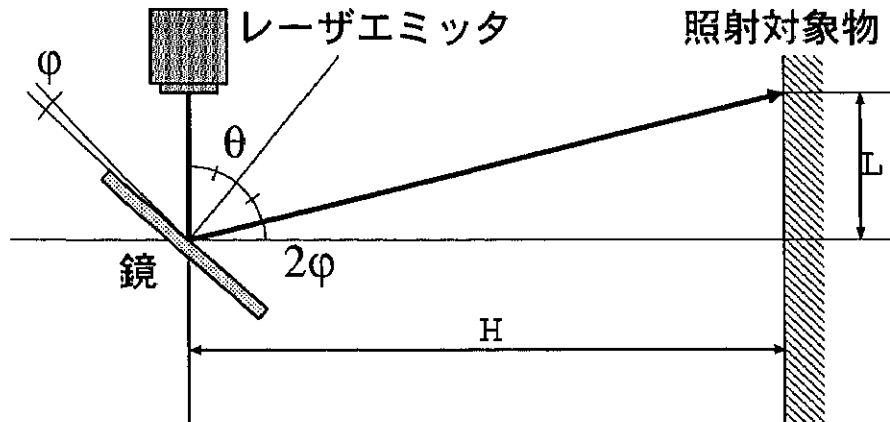


図 3.6: 鏡の回転角とレーザ移動量の関係

成す角は 2φ となる。従って、鏡から照射対象物までの距離を H とすると、モータの回転角 φ に対する照射対象物上でのレーザポイントの移動量 L の間には

$$\begin{aligned}\tan(2\varphi) &= \frac{L}{H}, \\ \varphi &= \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{L}{H}\right)\end{aligned}\quad (3.3)$$

という関係が成り立つ。

一般的な NTSC カメラの解像度が³⁾、幅 640 ドット、縦 480 ドットということ を考慮すると、図 3.5 における書画カメラ領域の X 軸方向の最低回転角を φ_x とすると、

$$\begin{aligned}\varphi_x &= \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{1}{1,200}\right) \\ &= 0.024^\circ\end{aligned}\quad (3.4)$$

Y 軸方向 φ_y も同様に

$$\begin{aligned}\varphi_y &= \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{1}{1,200}\right) \\ &= 0.024^\circ\end{aligned}\quad (3.5)$$

となる。実際にはこの値に一番近いモータの回転角である 0.0288° を最小分解能として採用した。

このときのレーザスポットの移動量は

$$\begin{aligned} L &= H \cdot \tan(2\varphi) \\ &= 1,200 \tan(2 \times 0.0288) \\ &= 1.2(mm) \end{aligned} \tag{3.6}$$

となる。従って、理論上のレーザスポットの最小移動量は 1.2mm となる。

書画カメラ領域周辺部と中心部におけるレーザスポット移動量の誤差

これまでの議論は、レーザの移動がレーザポインタユニットの鉛直下方で行われた場合に限られてきたが、実際は書画カメラ領域上の任意の場所にレーザスポットが移動する。従って周辺部に移動するにつれモータ 1 パルスあたりの移動量は中心部における移動量と異なってくる。

ここで、書画カメラ領域 X 軸方向の一番外側における 1 パルスあたりの移動量を計算すると、

$$\begin{aligned} L &= H \cdot (\tan(9.93^\circ) - \tan(9.93 - 2 \times 0.0288)) \\ &= 1.24(mm) \end{aligned} \tag{3.7}$$

となる。この値は式 (3.6) の値と比較しても、誤差は 2.5% に収まるため、ここでは特別に補正を行っていない。

3.4.2 遠隔操作ソフトウェア

タッチパネル上の指が触れた位置を検出し、その座標に応じてレーザスポットを移動させるためのプログラムであり、Server-Client 形式となっている。

実験環境、あるいは利用できる PC に応じて、GestureLaser を制御する PC の設置方法には 2 つの選択肢がある。1 つは、各拠点にレーザ、あるいはタッチパネル制御のための PC を置く方法 (図 3.7) であり、もうひとつは 1 台の PC で全ての管理を行う方法 (図 3.8) である。

GestureLaser, およびタッチパネルの制御にはシリアルポートを各1つ必要とする。ノート PC のように, シリアルポートを持たない PC でこれらの制御を行う場合, 図 3.8 の方式が有効である。この場合, GestureLaser, およびタッチパネルへ入出力されるシリアルデータを, TCP/IP のパケットに一度変更する必要がある。ここでは, 変換器として TRISTATE 社の PICNIC を用いた。

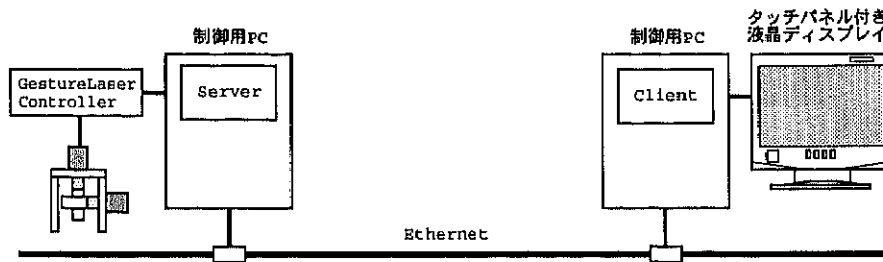


図 3.7: GesttureLaser の遠隔操作 — PC2 台版

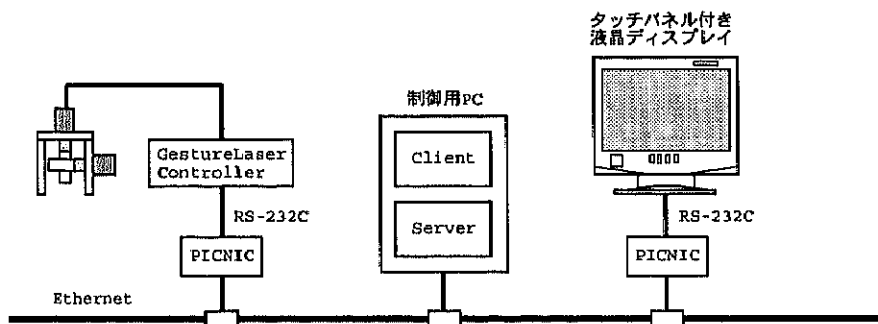


図 3.8: GesttureLaser の遠隔操作 — PC1 台版

3.4.3 キャリブレーション

図 3.9 に示すようにタッチパネルを押した場所に対応して, 相手の書画カメラ領域にレーザを照射するためにキャリブレーションを行っている。

本来は GestureLaser 固有の座標軸, レーザが照射される平面の座標軸, そしてカメラ系の座標軸と 3 つの座標軸が存在するが, ここでは GestureLaser の座標軸とレーザが照射される平面の座標軸は同一のものと仮定する。タッチパネル上の座標 (X, Y) と平面に照射されたレーザのスポットの座標 $(x, y, 0)$ を対応させるに

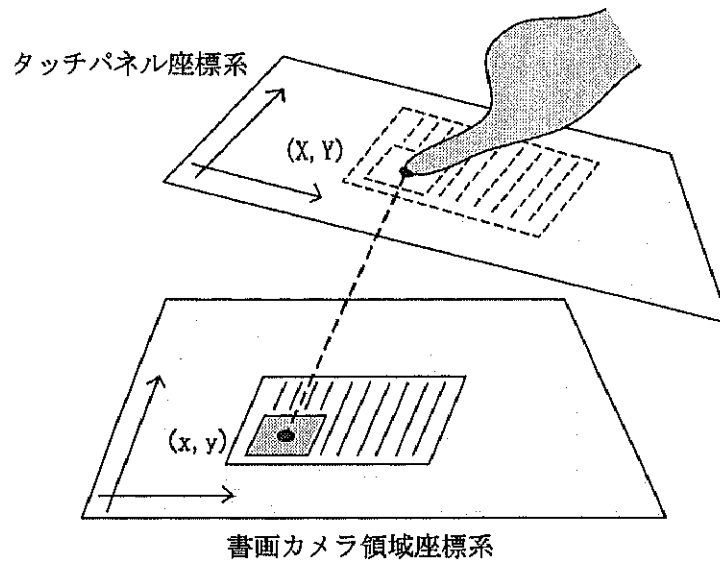


図 3.9: キャリブレーション

は、タッチパネル上での座標系に対し、ある並進・回転運動による透視変換を行う必要がある。レーザスポットの座標系は三次元座標系であるが、書画カメラ領域に提示されるものは紙であると考え、その高さは無視してよいので常に $z = 0$ の平面に投影されるものと考えることができる。このとき、両者の間には

$$X = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_7x + a_8y + 1} \quad (3.8)$$

$$Y = \frac{a_4x + a_5y + a_6}{a_7x + a_8y + 1} \quad (3.9)$$

という関係がある。ここで a_1, \dots, a_8 は未知の係数で、カメラの外部パラメータ（位置や方向）、および焦点距離などの内部パラメータである。未知数の数は 8 個なので、タッチパネル座標系に対応する GesturLaser 座標上の点を 4 つ求めればこれらの未知数は歴本らの示した方程式 [歴本 96] を解くことで求めることができる。

即ち,

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -X_1y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_2x_2 & -X_2y_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_3x_3 & -X_3y_3 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_4x_4 & -X_4y_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -Y_1x_1 & -Y_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -Y_2x_2 & -Y_2y_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -Y_3x_3 & -Y_3y_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & -Y_4x_4 & -Y_4y_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

となる.

実際のキャリブレーションでは, 書画カメラ領域の四隅にレーザスポットを照射し, タッチパネルディスプレイに表示されたそれらのスポットをタッチパネル上で指で触れることによって, 書画カメラ領域に照射されたレーザスポットの座標 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ の4点に対応するタッチパネル上での座標 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), (X_4, Y_4)$ を求める. これらの座標を用いて連立一次方程式を解くことで未知数 a_1, \dots, a_8 を求める. 計算にはガウス消去法を用いている. 次に, ここで求めた a_1, \dots, a_8 をもとに, タッチパネル上での座標 (X, Y) を GestureLaser 座標系での座標 (x, y) に変換する. 式 (3.8), (3.9) を変形すると以下の式になる.

$$x = \frac{(Y - a_6)(a_8X - a_2) - (X - a_3)(a_8Y - a_5)}{(a_7X - a_1)(a_8Y - a_5) - (a_7Y - a_4)(a_8X - a_2)} \quad (3.11)$$

$$y = \frac{(Y - a_6)(a_7X - a_1) - (X - a_3)(a_7Y - a_4)}{(a_8X - a_2)(a_7Y - a_4) - (a_8Y - a_5)(a_7X - a_1)} \quad (3.12)$$

この式によりタッチパネル座標系 (X, Y) に対応する GestureLaser 座標系 (x, y) を求めることができる. これらのソフトウェアは FreeBSD 上で実現した.

3.5 実画像通信用ネットワークシステム

本システムは筑波大学内の2地点 (工学系学系棟 3M410, およびベンチャービジネ斯拉ボラトリ 302-1) に分散して設置しており, 実画像・音声回線とレーザポ

インタ操作のネットワーク回線は光ファイバによる 155Mbps の ATM 回線を用いて構築した。2 棟間は直接接続されておらず、一度学術情報処理センターを経由している。また、これらの ATM 回線は研究室独自の物であり、第三者の利用が原因となる帯域の輻輳は生じないため、常に安定した通信が行える。

表 3.7 に本実験で利用した実画像・音声の圧縮方式と、占有した帯域幅を示す。画像の圧縮・伸長および転送に伴う時間遅れは、圧縮の方式や設定にもよるが、片道 100msec~200msec 程度である。

表 3.7: 利用した圧縮方式と占有帯域

領域	圧縮方式	占有帯域
正面画像	MPEG-2	12Mbps
書画カメラ画像	IEEE1394	33Mbps
レーザポインタ制御	(TCP/IP)	数 Kbps

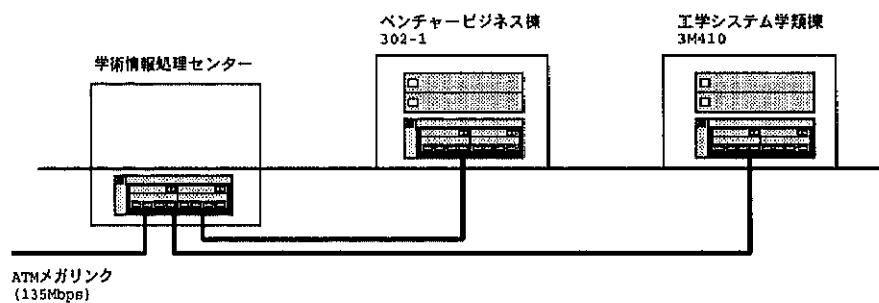


図 3.10: ATM 接続図